

*Е.И. Коновалова<sup>1</sup>, А.А. Подшивалова<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КРОМКАХ ПОДОШВЫ РЕЛЬСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**Аннотация.** *В данной работе проводится расчёт напряжений, возникающих в кромках подошвы рельса в зависимости от осевых нагрузок с использованием компьютерной программы инженерного анализа Femap. Рассматривается решение поставленной задачи с помощью методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности и метода конечных элементов. Производится сопоставление результатов расчетов, полученных в ходе компьютерного моделирования с результатами, полученными по общеизвестным типовым методикам. Показана хорошая сходимость результатов. С помощью проведения инженерных расчетов можно получать достаточно точные значения осевых нагрузок, при которых, в пределах заданного срока и условий эксплуатации, гарантируется нормальная работа элементов верхнего строения пути.*

**Ключевые слова:** *железнодорожный путь, рельс, кромочные напряжения, осевые нагрузки*

*Е.И. Konovslova<sup>1</sup>, А.А. Podshivalova<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **DETERMINATION OF STRESS IN THE EDGES OF THE RAIL SOLE UNDER IMPACT OF THE ROLLING STOCK ON IT**

**Abstract.** *In this paper, the stresses arising in the edges of the rail sole depending on the axial loads are calculated using the Femap computer program for engineering analysis. The solution of the problem is considered using the method of assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability and the finite element method. The results of calculations obtained in the course of computer modeling are compared with the results obtained by well-known standard methods. Good convergence of the results is shown. With the help of engineering calculations, it is possible to obtain sufficiently accurate values of axial loads, at which, within a given period and operating conditions, the normal operation of the elements of the upper structure of the track is guaranteed.*

**Key words:** *railway track, rail, edge stresses, axial loads.*

### **Введение**

Задача увеличения провозной и пропускной способности Восточного полигона в условиях несоответствия уровня развития инфраструктуры потребностям перевозочного процесса в некоторой степени в настоящее время решается в том числе за счет увеличения массы поездов и использования вагонов с повышенной осевой нагрузкой. На сегодняшний день в пределах Восточного полигона доля поездов массой 5 тыс. тонн и более составляет около 77% от общего количества грузовых поездов, в том числе поездов весом 6 тыс. тонн и почти 49 %. С 2014 года на Восточно-Сибирской железной дороге начали обращаться поезда массой до 7,1 тыс. тонн с повышенной осевой нагрузкой до 25 т/ось. Анализ источников [1,2] показал, что 18 лет назад доля поездов массой 6 тыс. тонн и выше составляла всего 30 %. Это говорит о том, что по сравнению с тем периодом количество поездов массой 6 тыс. тонн и более в настоящее время увеличилось в 1,6 раза.

С учетом вышеизложенного целью проведения инженерных расчетов является

определение таких сил и напряжений, при которых, в пределах заданного срока и условий эксплуатации, гарантируется нормальная работа элементов верхнего строения пути и не снижается их долговечность. С этой стороны необходимо изучать одну из самых актуальных современных проблем – проблему возможных оптимальных границ повышения осевых нагрузок и весов поездов на основе выбора прочностных критериев и уточнения их значений.

Повышение осевых нагрузок неизбежно вызывает рост механических напряжений в зоне контакта колеса и рельса, а также по всему сечению рельса. Одной из самых проблемных зон поперечного сечения рельса, является зона «перьев» подошвы рельсов. Проблема заключается в том, что на сегодняшний день современные средства дефектоскопии рельсов способны выявлять только поперечно ориентированные трещины подошвы высотой более 7 мм, расположенные в проекции шейки. Отсутствуют технологии и средства, позволяющие обнаруживать дефекты в перьях подошвы. По этим причинам значительный процент дефектов по коду 69 не выявляется и приводит к 20% изломов рельсов [3].

В данной работе представлена математическая модель контактного взаимодействия колеса и рельса в среде конечно-элементного моделирования в системе Femap. Моделировались различные величины осевых нагрузок, действующих от подвижного состава на рельс. Основной задачей было определить напряжения, возникающие в кромках подошвы рельса при действии различных осевых нагрузок. Кроме того, необходимо было сопоставить полученные результаты в ходе компьютерного моделирования с результатами, полученными по классическим расчетным методикам.

Для того, чтобы изучить процессы возникающие в результате взаимодействия пути и подвижного состава, использовалась методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности [4].

#### **Определение напряжений в кромках подошвы рельса по методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности**

Данная методика предназначена для определения показателей напряженно-деформированного состояния пути при решении следующих задач:

–определения напряжений в элементах верхнего строения пути при разработке новых конструкций;

–определения показателей воздействия на путь нового и модернизированного подвижного состава, в том числе с повышенными осевыми и погонными нагрузками для допуска его на инфраструктуру ОАО «РЖД».

Расчет проводился с использованием следующих исходных данных: вертикальная нагрузка от колеса на рельс имеет смещение (эксцентриситет) относительно оси симметрии сечения рельса. Со стороны гребня колеса на головку рельса действует горизонтальная сила. Вследствие этого в наружной кромке подошвы и внутренней кромке головки рельса сложное напряженное состояние. Напряжения в кромках подошвы рельса определялись по формуле:

$$\sigma_k = f \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

$f$  – коэффициент перехода от осевых напряжений в подошве рельса к кромочным, учитывающий действие горизонтальных нагрузок на рельс и эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки, см<sup>2</sup>/1,

$\sigma_0$  –максимальные напряжения в элементах верхнего строения пути в подошве рельса от его изгиба под действием момента. В итоге получили значения полученных напряжений при разных осевых нагрузках:

при осевой нагрузке 20 т/ось:  $\sigma_k = 786,64$  кгс/см<sup>2</sup>

при осевой нагрузке 23 т/ось:  $\sigma_k = 802,38$  кгс/см<sup>2</sup>

при осевой нагрузке 27 т/ось:  $\sigma_k = 806,88$  кгс/см<sup>2</sup>

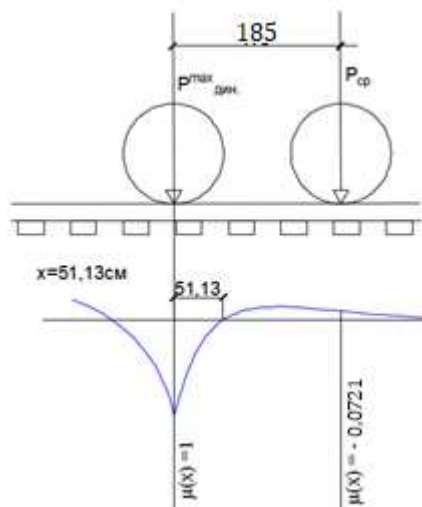
Перед этим были подсчитаны: вертикальные нагрузки колеса на рельс, динамические нагрузки, среднеквадратические отклонения, максимальные эквивалентные нагрузки для расчетов напряжений в рельсах от изгиба и кручения по формуле:

$$P_{\text{экр}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} + \sum \mu_i * P_{\text{ср}i}, \quad (2)$$

например, при осевой нагрузке 20 т/ось:

$$P_{\text{ЭКВ}}^I = 18081,95 + (-0,0721) * 13900 = 17079,76 \text{ кгс.}$$

Расчетная схема, а также линия влияния моментов  $\mu(x)$  от действия колесной нагрузки  $P_{\text{ЭКВ}}^I$  для четырехосного вагона на прямом участке представлена на рисунке 1.



**Рис.1 – Линия влияния моментов  $\mu(x)$  от действия колесной нагрузки  $P_{\text{ЭКВ}}^I$  для четырехосного вагона на прямом участке**

Определение изгибающего момента, давления на шпалу и прогиба:

$$M = \frac{P_{\text{ЭКВ}}^I}{4 * k}, \quad (3)$$

при осевой нагрузке 20 т/ось:  $M=277990,89 \text{ кгс*м.}$

Осевое напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_o = \frac{M}{W}. \quad (4)$$

$W$  – момент сопротивления рельса по низу подошвы.

### **Определение напряжений в кромках подошвы рельса методом конечных элементов в системе Femar**

Альтернативой классическим методам расчета прочности (в отношении сокращения временных затрат при проектировании конструкций, а также для повышения уровня информативности их работоспособности) служит развитие теоретических подходов с использованием компьютерных технологий. В связи с этим, для определения напряжений в кромках подошвы рельсов, нами был выбран программный комплекс инженерного анализа Femar. Программа Femar это комплекс, обеспечивающий решение сложных задач инженерного анализа в различных отраслях, в том числе железнодорожной отрасли [5-7].

При решении были использованы следующие граничные условия и нагрузки:

- по зоне подошвы рельса смоделирована жесткая заделка;
- контактная поверхность колеса и оси перемещается при одноточечном контакте только в вертикальном направлении.
- остальные элементы не закреплены;
- усилие приложено с помощью «дистанционной точки», что позволяет смоделировать воздействие осевой нагрузки наиболее близко к реальному физическому процессу, происходящему при контакте.

Параметры исходных данных:

- колесо вагонное диаметром 950 мм;
- осевая нагрузка 20, 23 и 27 т/ось;
- ось колеса находится в вертикальном положении;

- ось рельса с наклоном 1/20;
  - контактирующие поверхности в соответствии с заданными профилями.
- Схема приложения нагрузок представлена на рисунке 2.

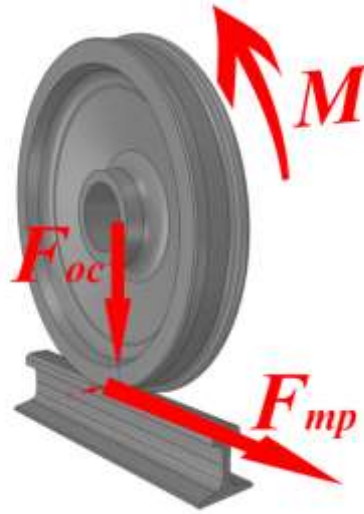


Рис. 2. Схема приложения нагрузок, где  $F_{ос}$  – осевая нагрузка,  $F_{тр}$  – сила трения при контакте колес и рельса;  $M$  – крутящий момент

В ходе моделирования в системе Femap получены эквивалентные напряжения в кромках подошвы рельса. Данные расчетов при осевой нагрузке 20т/ось представлены в виде изоповерхностей (рис.3).

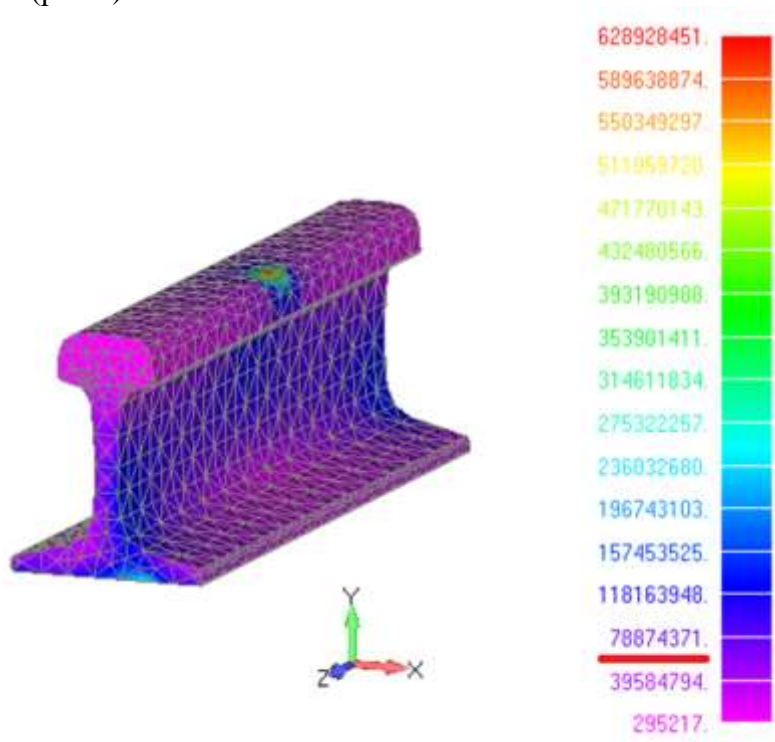


Рис. 3. Эпюра кромочных напряжений в рельсе, Па

Аналогичным образом проводились расчеты при нагрузках в 23 т/ось и 27 т/ось. По результатам теоретических расчетов по методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, а также по результатам расчетов компьютерного моделирования были построены графические зависимости, которые представлены на рисунке 4.

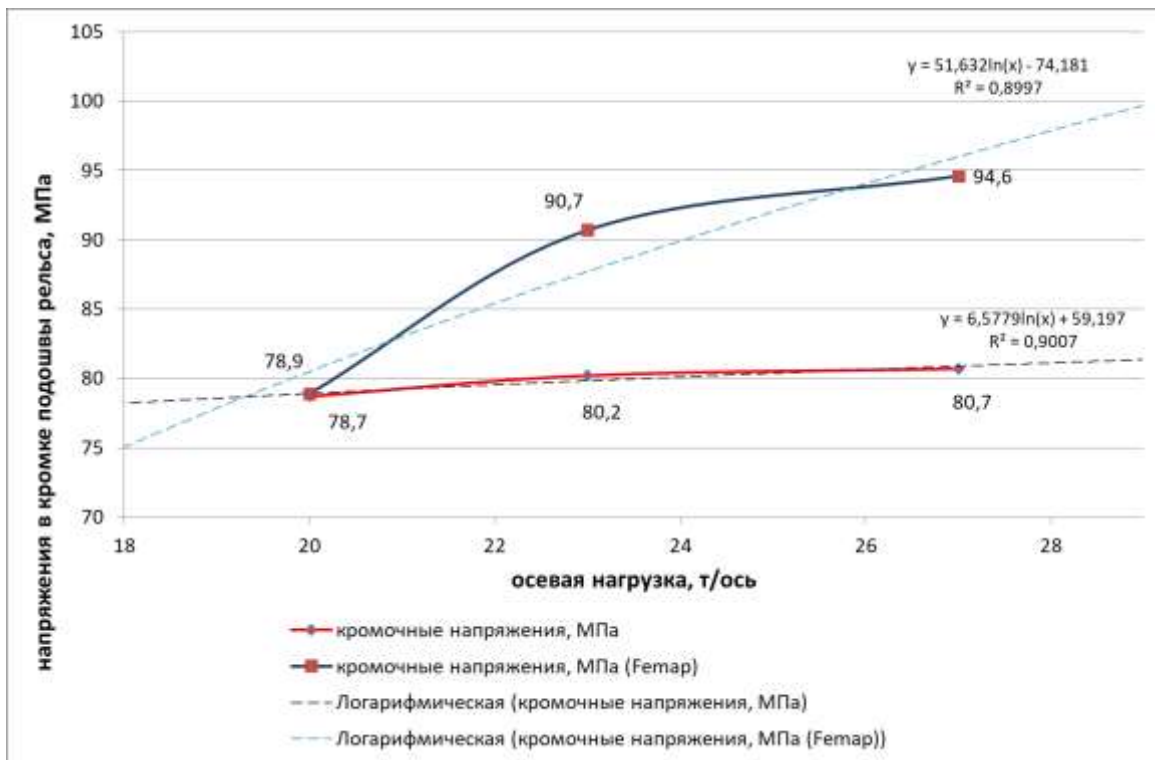


Рис. 4. График сравнение результатов моделирования и теоретических расчетов

Таким образом, используя кривые аппроксимации, становится возможным определить напряжения в кромках подошвы рельса в зависимости от осевой нагрузки. Результаты представлены далее:

Уравнения аппроксимации:

Расчет методом конечных элементов  $\sigma = 51,63 \ln(P) - 74,18$

Расчет методом оценки воздействия подвижного состава на путь

$\sigma = 6,58 \ln(P) + 59,20$

### Заключение

Общие напряжения изгиба и кручения в кромках подошвы рельса меньше допускаемых, равных для вагона  $[\sigma_k] = 1500 \text{ кгс/см}^2$ . Хотя при росте осевой нагрузки значение максимальных напряжений приближаются к предельно допустимым, что говорит о снижении надежности и прочности рельса в таких условиях.

Приведенные графические зависимости показывают, что погрешность расчетов программном комплексе Femap меняется от 0,3 до 17% в зависимости от осевой нагрузки. Это говорит о некотором упрощении компьютерной модели. Для того, чтобы провести наиболее достоверные расчеты необходимо более точно создавать граничные условия, факторы внешнего воздействия, провести нелинейный анализ и определить контактные взаимодействия колеса и рельса.

Компьютерные технологии позволяют на сегодняшний день достаточно точно проводить расчеты прочности и устойчивости разных конструкций. С помощью проведения инженерных расчетов можно получать достаточно точные значения осевых нагрузок, при которых, в пределах заданного срока и условий эксплуатации, гарантируется нормальная работа элементов верхнего строения пути.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ресельс А.П. Проблемы эксплуатации кривых участков пути при организации тяжеловесного движения на Восточном полигоне [Текст] / А.П. Ресельс, Е.В. Филатов // Вестник транспорта Поволжья. – Самара: Изд-во СамГУПС. – 2019. – № 6. – с. 42–48.
2. Филатов Е.В. Особенности угона железнодорожного пути в кривых участках и разработка мероприятий по его предотвращению : диссертация кандидата технических наук. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, 2004.
3. Ходырев Ю.А. Анализ эффективности работы съемных дефектоскопов и дефектоскопных автотрис [Текст] / Ю.А. Ходырев, А. П. Матросов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС. – 2012. – Т.1. – с. 540–544.
4. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, утверждена распоряжением ОАО "РЖД" №2706/р от 22.12.2017г.
5. Ковенькин Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния подкладок скрепления ЖБР. [Текст] / Д.А. Ковенькин, В.А. Покацкий // В сборнике: Проблемы модернизации инфраструктуры Транссибирской магистрали. Сборник научных трудов. – Чита – 2005. – с. 66-69.
6. Ковенькин Д.А. Особенности эксплуатации скреплений ЖБР-65Ш на горно-перевальном участке Слюдянской дистанции пути ВСЖД. [Текст] / Д.А. Ковенькин, Р.Н. Галеев // В сборнике: Проблемы проектирования и строительства железных дорог. Межвузовский сборник научных трудов. – Хабаровск – 2011. – с 64-71.
7. Ковенькин Д.А. Расчет упругих характеристик железнодорожного пути [Текст] / Д.А. Ковенькин, Д.С. Алтынников // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС. – 2018. – Т.1. – с. 471–175.

## REFERENCES

1. Resels A.P. Problems of operation of curved track sections when organizing heavy-log traffic at the Eastern polygon [Text] / A.P. Resels, E.V. Filatov // Bulletin of transport of the Volga region. - Samara: Publishing house of SamGUPS. - 2019. - No. 6. - p. 42-48. [in Russian].
2. Filatov E.V. Features of theft of a railway track in curved sections and the development of measures to prevent it: dissertation of the candidate of technical sciences. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 2004. [in Russian].
3. Khodyrev Yu. A. Analysis of the efficiency of removable flaw detectors and flaw detection systems [Text] / Yu. A. Khodyrev, A. P. Matrosov // Transport infrastructure of the Siberian region. - Irkutsk: Publishing house of IRGUPS. - 2012. - Vol. 1. - p. 540-544. [in Russian].
4. The methodology for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability, approved by the order of JSC "Russian Railways" No. 2706/r of 22.12.2017.
5. Kovenkin D. A. Investigation of the stress-strain state of the bond linings ZhBR. [Text] / D. A. Kovenkin, V. A. Pokatsky // In the collection: Problems of modernization of the Trans-Siberian Railway infrastructure. Collection of scientific papers. - Chita-2005. - pp. 66-69. [in Russian].
6. Kovenkin D. A. Features of the operation of the fasteners of the ZhBR-65SH on the mountain-pass section of the Slyudyanskaya distance of the VSZHD route. [Text] / D. A. Kovenkin, R. N. Galeev // In the collection: Problems of design and construction of railways. Interuniversity collection of scientific papers. - Khabarovsk-2011. - with 64-71. [in Russian].
7. Kovenkin D. A. Calculation of elastic characteristics of the railway track [Text] / D. A. Kovenkin, D. S. Altynnikov // Transport infrastructure of the Siberian region. - Irkutsk: Publishing house of IRGUPS. - 2018. - Vol. 1. - p. 471-175. [in Russian].

### **Информация об авторах**

*Коновалова Екатерина Ивановна* – студентка факультета «Строительство железных дорог», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [Konovalova38ekaterina@gmail.com](mailto:Konovalova38ekaterina@gmail.com)

*Подшивалова Анастасия Алексеена* – студентка факультета «Строительство железных дорог», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [Belozeroва.1999@mail.ru](mailto:Belozeroва.1999@mail.ru)

### **Для цитирования**

Коновалова Е.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КРОМКАХ ПОДОШВЫ РЕЛЬСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА [Электронный ресурс] / Е.И. Коновалова, А.А. Подшивалова // «Молодая наука Сибири»: электрон. науч. журн. – 2021. - № 1(11). – Режим доступа: <http://mnmv.irgups.ru/toma> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

### **For quoting**

Konovalova E.I. DETERMINATION OF STRESS IN THE EDGES OF THE RAIL SOLE UNDER IMPACT OF THE ROLLING STOCK ON IT [Electronic resource] / E.I. Konovalova, A.A. Podshivalova // «Young Science of Siberia»: electron. scientific journals – 2021. - № 1(11). – Access mode: <http://mnmv.irgups.ru/toma/> free. - Title from the screen. - Yaz. Rus.